

## **Modelamiento energético y mecánico de un motor Stirling tipo beta para la generación de 70 We para el DECEM - UGI**

**David Orquera R. & Fabián Chávez A.**

*Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica, Escuela Politécnica del Ejército, Sangolquí, Pichincha, Ecuador*

---

### **RESUMEN**

En la siguiente investigación presentamos el análisis, cálculos, modificaciones y simulaciones para alcanzar el objetivo principal de este estudio, el cual es el modelamiento energético y mecánico de un motor Stirling tipo beta de 70 We, para el DECEM - UGI. Para el desarrollo se partió de varios puntos como son: ciclo Stirling, movimiento alternativo, efecto de la transferencia de calor, ciclo Schmidt y la ecuación de Beale, para los cuales hemos utilizado programas computacionales como son Mathcad, Excel, y SolidWorks con el cual hemos realizado la simulación. Con el conocimiento de datos como son la temperatura del foco frío de 50°C, del caliente 700°C, de la temperatura ambiente, carreras, longitudes, configuraciones, diámetros, revoluciones del motor 2000 rpm, presión en la ciudad de Quito 72794 Pa, y el aire como fluido de trabajo, se realizó el estudio del prototipo existente, el cual se determinó que podrá entregar 30 We como máximo, por lo que fue necesario realizar modificaciones para aumentar la potencia en un 134%, estas son aumentos de diámetros, carreras, longitudes, adoptando criterios como la mínima distancia pistón – desplazador, y el aumento del número de Beale a 0.14. Estas modificaciones no serían factibles de ser realizadas en el prototipo existente, por ello se tuvo que realizar nuevo para la fabricación del nuevo motor y así proseguir con la simulaciones.

### **ABSTRACT**

In the following study we present the analysis, calculations, modifications and simulations to achieve the main objective of this study, which is the energy and mechanical modeling of a Stirling engine beta type of 70 We, for DECEM - UGI. For the development of several points split as: Stirling cycle, reciprocating, effect of heat transfer, Schmidt cycle and the Beale equation, for which we have used computer programs such as Mathcad, Excel, and SolidWorks with which we performed the simulation. With knowledge of data such as the temperature of the cold focus of 50 ° C, the hot 700 ° C, ambient temperature, racing, lengths, configurations, sizes, engine speed 2000 rpm, pressure on the city of Quito 72794 Pa, and the air as the working fluid, we performed the study of existing prototype, which determined that 30 We can deliver most, so it was necessary to make modifications to increase power by 134%, these are increases in diameter, racing, lengths, adopting the minimum distance criteria as piston – displacer piston, and increased to 0.14 Beale number. These changes would not be feasible to be made in the existing prototype, so we had to make a new design for manufacturing the new engine and thus continue with the simulations.

## INTRODUCCIÓN

Una de las tecnologías de mayor interés dentro del campo de las energías renovables es la relacionada con la energía solar termoeléctrica, donde se investiga la factibilidad de utilización de la radiación solar térmica de alta temperatura para la generación de electricidad, sin emitir sustancias radioactivas, ni contaminantes.

Para la generación de electricidad con energía solar térmica es necesario seguir un proceso para los cuales se necesitan los siguientes componentes: un colector parabólico con un sistema de seguimiento en tres dimensiones con sensores de radiación solar, un motor Stirling que recepte la radiación solar y un alternador capaz de transformar la energía mecánica a energía eléctrica.

Esta investigación se centra en el motor Stirling Tipo Beta, hay proyectos previos realizados para el diseño y construcción de dicho motor con metodologías diferentes, por lo que este estudio considera el método de Schmidt, la ecuación de Beale, transferencia de calor para el diseño térmico y el movimiento alternativo para el cálculo cinemática con el fin de llegar a generar 70 We,

## DISEÑO TERMICO

### CONDICIONES PARA EL CALCULO TERMODINAMICO

El objetivo del cálculo termodinámico es determinar la presión máxima, mínima y media, trabajo, potencia y eficiencia en el motor a partir de las hipótesis de temperaturas.

Definimos las siguientes variables fundamentales:

- $T_{max}$ : Temperatura máxima del fluido de trabajo.
- $T_{min}$ : Temperatura mínima del fluido de trabajo

### CONDICIONES DE OPERACIÓN

Teniendo en cuenta que el motor tendrá que entregar una potencia de 70 vatios se debieron determinar las condiciones de operación tales como las temperaturas en la zona fría y caliente, presión interna y rpm, la geometría sería el resultado del análisis termodinámico.

- La potencia en el eje debería ser 70 W
- La temperatura en la zona caliente sería de 700°C
- La temperatura en la zona fría debería ser de 50°C
- Se asumió que el motor podría llegar a 2000 RPM.
- El aire de trabajo sería introducido al motor cuando el volumen en el interior de este fuera máximo. Este aire se estaría a temperatura ambiente (22°C) y a presión atmosférica de 72794 Pa.
- El motor será tipo beta.

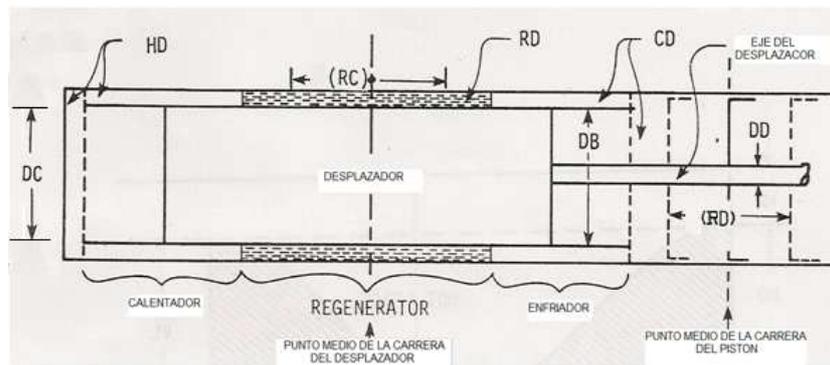
## METODO SCHMIDT

Teniendo en claro el tipo de motor y las condiciones de operación, se utilizaran los conceptos, las ecuaciones de Schmidt y la ecuación de Beale para obtener la geometría del motor (Volumen de Compresión y Expansión).

Básicamente el análisis de Schmidt está orientado a determinar la ecuación del parámetro de trabajo para la configuración correspondiente. Este parámetro adimensional constituye la parte más importante del análisis porque permite optimizar los parámetros del diseño de la maquina que definen el dimensionamiento básico, estos son:

- Relación de temperatura.
- Relación de volumen muerto.
- Relación de volumen traslapado.
- Relación de volúmenes barridos.
- Angulo de desfasaje.

La nomenclatura de los volúmenes internos y los parámetros de los elementos se describen en la siguiente figura:



**Figura 1.** Parámetros del motor Stirling tipo Beta

**Tabla 1.** Parámetros y resultado del trabajo del motor Stirling Tipo Beta

ESPECIFICACION	STIRLING BETA		
	Dato	Valor	Unidad
Diámetro del desplazador.	DB	3,6	cm
Diámetro del eje del desplazador.	DD	0,3	cm
Diámetro interior del cilindro.	DC	3,8	cm
Carrera del desplazador.	RC	4	cm
Carrera del pistón de potencia.	RD	4	cm
Temperatura en la zona caliente	TH	973	°K
Temperatura en la zona fría	TC	323	°K
Constante universal de los gases	R	287	J / Kg°K
Angulo de fase	AL	90	grados
L regenerador (LR)	LR	5,5	cm
L desplazador (Ld)	Ld	11	cm
dcd cil-desp	dcd	0,1	cm
Patm	Patm	7,28E-02	MPa
dpp piston-desp	dpp	0,05	cm
Trabajo	W	2.60	J

## ECUACION DE BEALE

Pruebas hechas en motores contruidos nos permiten establecer perdidas por fricción, caídas de presión en los conductos, pérdidas de fluido de trabajo mediante un factor que es el número de Beale, establecidos de acuerdo a la temperatura del foco caliente.

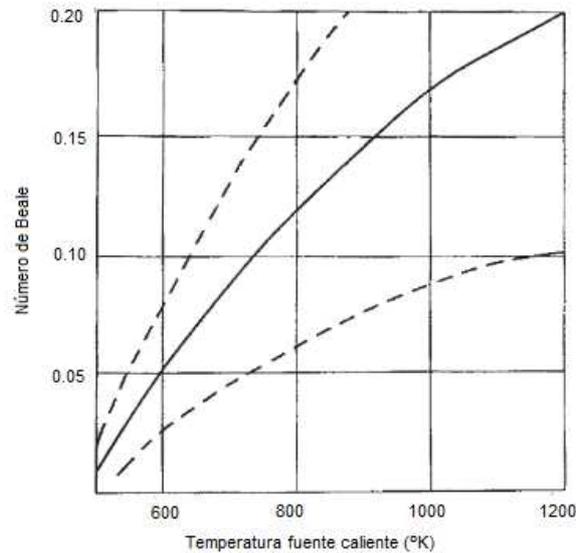


Figura 2. Número de Beale

Con la siguiente ecuación se encuentra la potencia en el eje ( $P_w$ ).

$$P_w = B_n \times P \times V_{max} \times N$$

Donde:

$B_n$ : es el número de Beale

$P$ : es la presión media ( $P_m$ )

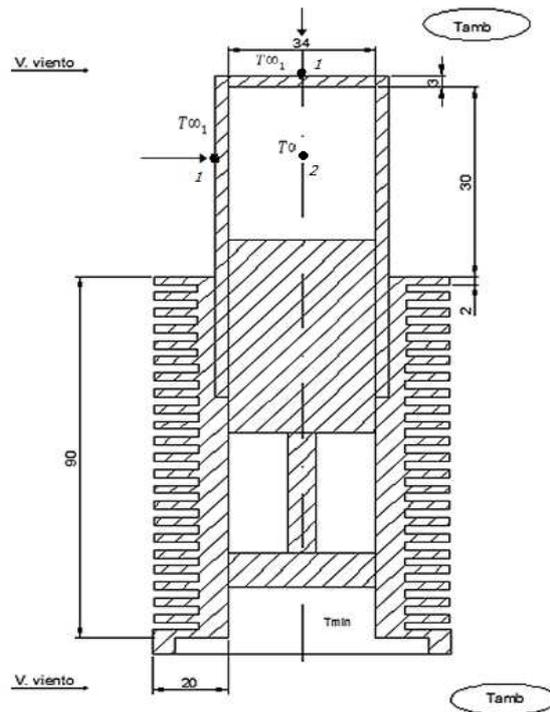
$V$ : es el volumen máximo en centímetros cúbicos

$N$ : es la velocidad del motor en Hertz

Potencia	$P_w$	70	W
----------	-------	----	---

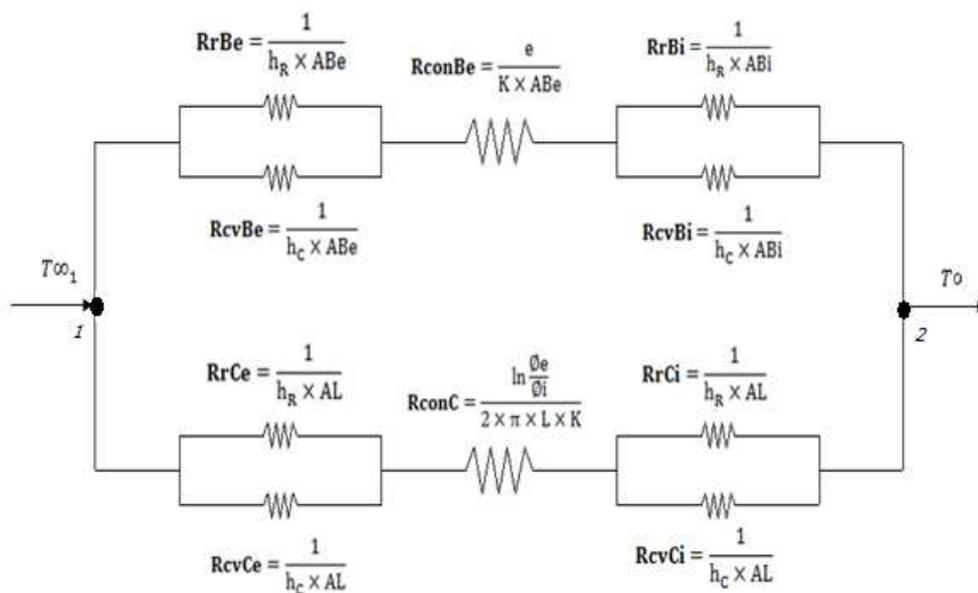
## TRANSFERENCIA DE CALOR

El objetivo del análisis de transferencia de calor es determinar las temperaturas que se lograrán en el interior del cilindro. En el foco caliente y en el foco frío existen tres medios de transferencia de calor los cuales son: conducción, convección, radiación.



**Figura 3.** Esquema físico del foco frío y caliente

En el foco caliente existe un flujo de calor hacia el interior del sistema y además existe una constante fuga de calor debido a los fenómenos de convección y de radiación a través de la base del cilindro y la zona lateral. Para resolver este problema planteamos un circuito térmico correspondiente al esquema físico del foco caliente.



**Figura 4.** Circuito térmico equivalente

Para determinar las temperaturas en el interior de la cámara se realizó la siguiente hipótesis.

**Hipótesis:**

Base interior

$$Q1 \approx \dot{W}_{generada}$$

$$P_w = \frac{T_1 - T_0}{RT1}$$

<b>T0</b>	<b>698.82 °K</b>
-----------	------------------

Zona lateral interior

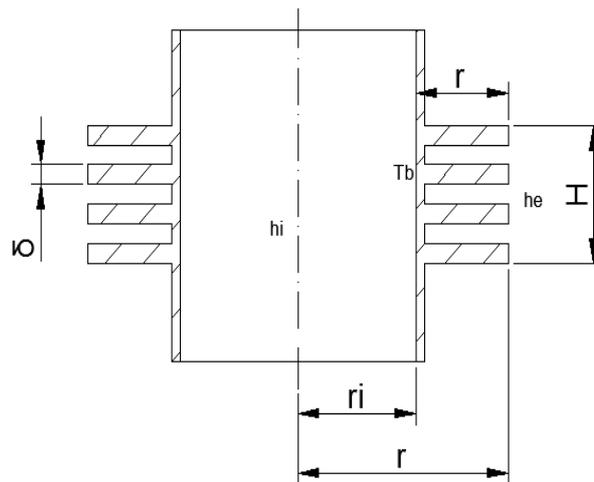
$$Q2 \approx \dot{W}_{generada}$$

$$P_w = \frac{T_1 - T_0}{RT2}$$

<b>T0</b>	<b>687.78 °K</b>
-----------	------------------

**ZONA ALETEADA**

El objetivo del análisis de transferencia de calor en las aletas es determinar el flujo de calor que estas generan y disipan al ambiente.



**Figura 5.** Variables para la resolución de las aletas

<b>QT</b>	<b>6.868 W</b>
-----------	----------------

## MODELAMIENTO TERMO - FISICO

Para el modelamiento termo – físico partimos de la ley de la conservación de la energía donde:

$$Q_{util} = Q_{abs} - Q_p$$

$$Q_{necesario} = Q_{abs} - UA(T_p - T_{\infty})$$

$$Q_{necesario} = \eta_o \times A_{espejo} \times G - \frac{1}{\sum R_{sq}} \times A(T_p - T_{\infty})$$

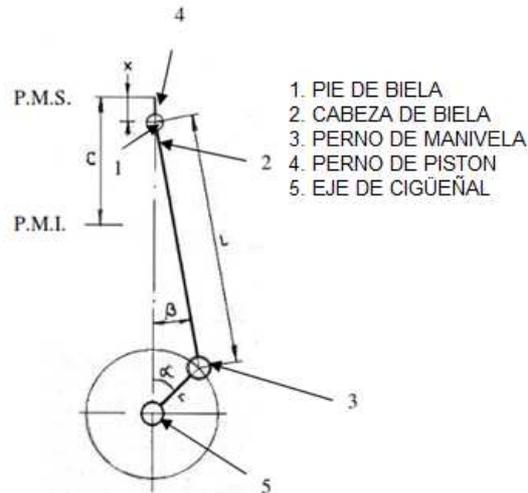
$$Q_{necesario} = \eta_o \times A_{espejo} \times G - \frac{1}{R_{CV} + R_R + R_{con}} \times A(T_p - T_{\infty})$$

Tabla 2. Parámetros para el modelamiento termo - fisico

Parametro	Definicion	Valor	Unidad
U	Coeficiente Universal de Transferencia de Calor	_____	W
A	Area del cilindro	_____	W
$T_p$	Temperatura caliente	_____	°K
$T_{\infty}$	Temperatura ambiente	_____	°K
$\eta_o$	Eficiencia Optica	82%	—
$Q_{abs}$	Calor absorbido	_____	W
$Q_p$	Calor Perdido	_____	W
$A_{espejo}$	Area del espejo	—	m <sup>2</sup>
G	Irradiación	834	$\frac{W}{m^2}$
$R_{CV}$	Resistencia Térmica de Convección	—	$\frac{°K}{W}$
$R_R$	Resistencia Térmica de Radiación	—	$\frac{°K}{W}$
$R_{con}$	Resistencia Térmica de Radiación	—	$\frac{°K}{W}$
A	Area del Motor Stirling	—	m <sup>2</sup>
$T_p$	Temperatura Caliente	700	°K
$T_{\infty}$	Temperatura Fría	50	°K

## CALCULO CINEMATICO

Se analiza el movimiento alternativo del pistón, los parámetros que intervienen y de cómo este se transforma en movimiento circular continuo del eje mediante el mecanismo biela – manivela.



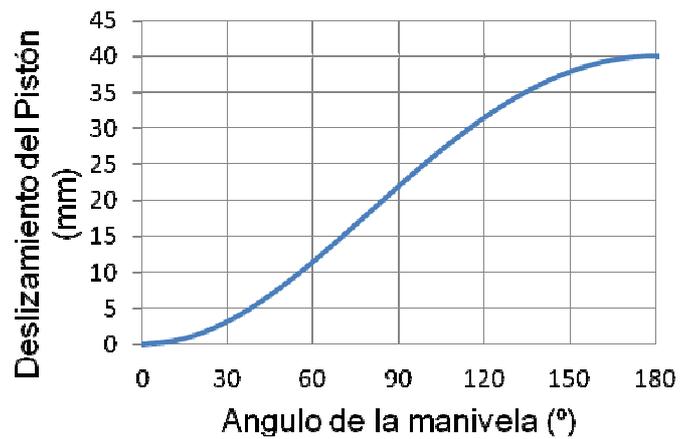
**Figura 6** Representación esquemática del mecanismo pistón – biela manivela

Para determinar la velocidad y la aceleración del pistón es necesario determinar, primero, la relación que hay entre los desplazamientos lineales (X) del pistón y los desplazamientos angulares  $\alpha$  de la manivela.

**Tabla 3** Tabla de parámetros de análisis para movimiento alternativo

ORDEN	PARAMETRO	NOMENCLATURA	MEDIDA	UNIDAD
1	Radio del cigüeñal	r	20	mm
2	Longitud de la manivela	L	105	mm
3	Carrera del pistón	C	40	mm
4	Número de revoluciones	n	2000	rpm
5	Angulo de fase	$\alpha$	0-360	°
6	Angulo de la manivela	$\beta$	–	°
7	Relación radio - longitud	$\lambda$	–	–

En la gráfica se puede observar que la curva obtenida tiene la forma de una función seno alcanzando su máximo desplazamiento para un ángulo de la manivela de  $180^\circ$ , y la velocidad lineal no es uniforme.



**Figura 7** Variación en el desplazamiento del pistón respecto al ángulo de la manivela

## FUERZA

El pistón de potencia entrega la fuerza para aplicar torque al cigüeñal.

La fuerza máxima será hacia afuera y está dada por:

$$F_{\max} = A \times (P_{\max} - P_{\text{amb}})$$

$$F_{\max} = 166.94 \text{ N}$$

La fuerza mínima será hacia adentro y está dada por:

$$F_{\min} = A \times (P_{\text{amb}} - P_{\min})$$

$$F_{\min} = -19.51 \text{ N}$$

## TORQUE

La tendencia de una fuerza hacer girar un cuerpo en torno a cierto eje se denomina torque y esta dado por la siguiente ecuación:

$$\tau = F \times d$$

$$\tau_{\max} = 3.39 \text{ J}$$

$$\tau_{\min} = -0.39 \text{ J}$$

# SIMULACIONES DEL MOTOR

## ARMADO DEL CONJUNTO

El armado del motor se realizo en el programa SolidWorks.

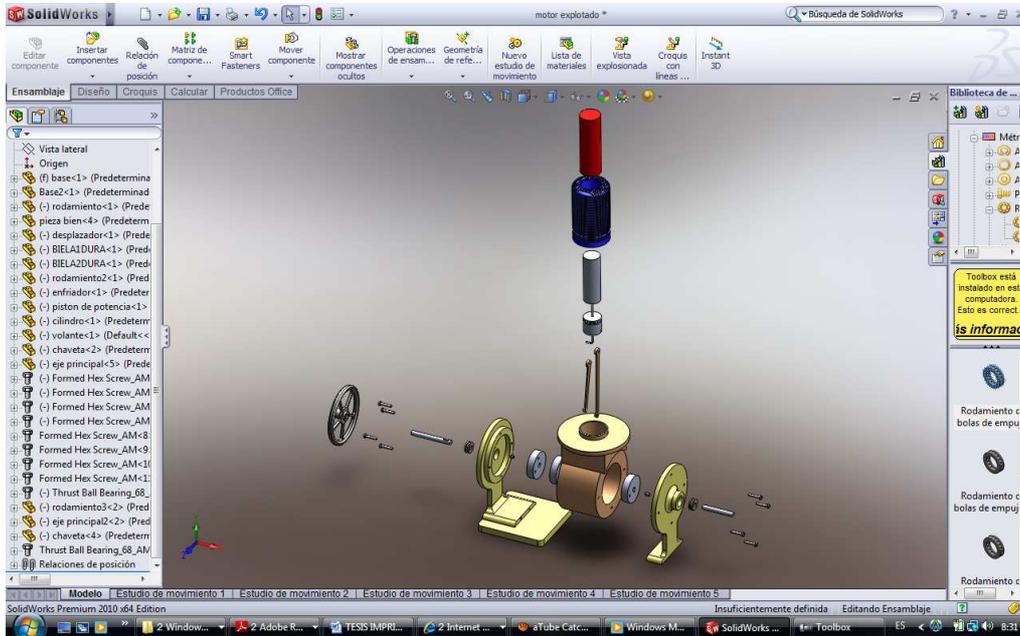


Figura 8 Armado del conjunto de las partes del motor

## SIMULACIÓN DEL MOTOR

Para la simulación y análisis dinámico del motor Stirling, se utilizo el programa de CosmosMotion de SolidWorks, tomando en consideración parámetros como son: las revoluciones máximas del motor (2000 RPM) y la gravedad (9,81 m/s<sup>2</sup>).

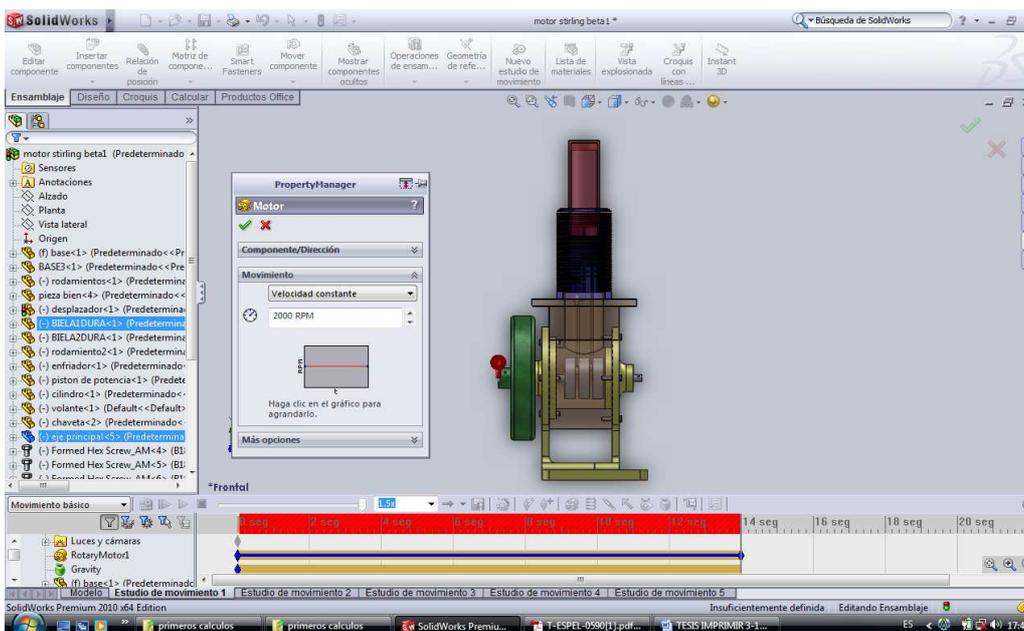


Figura 9 Simulación del motor

## **CONCLUSIONES**

- Este tipo de motor tiene la capacidad de convertir el calor en trabajo a través de un ciclo termodinámico regenerativo, con compresión y expansión cíclicas del fluido de trabajo, el cual se encuentra contenido en el interior del motor.
- En esta investigación desarrollamos una metodología de rediseño de motores Stirling basándonos en el modelo matemático de Schmidt, el cual nos entrega el trabajo útil realizado por el motor y con la ecuación de Beale que considera las pérdidas en el funcionamiento logramos obtener una potencia real.
- En este estudio especificamos los parámetros, variables y dimensiones adecuadas de un motor Stirling tipo Beta basándonos en un programa informático desarrollado en Mathcad para alcanzar la potencia requerida en esta investigación.

## **FUENTES DE INFORMACIÓN**

### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

1. Cengel, Y.; Transferencia de Calor; Editorial Mc Graw Hill Interamericana; Segunda Edición; México DF-México; 2006.
2. Z. Black; G. Hartley; Termodinámica; Editorial Addison-Wesley Educational Publishers; Segunda Edición; Mishawaka-USA; 1991.
3. Merle Potter; Elaine Scott; Termodinámica; Editorial Mc Graw Hill Interamericana; Segunda Edición; Madrid-España; 2004.
4. Vásquez Cervantes Jorge, Metodología para el rediseño de motores de Ciclo Stirling; Tesis; México DF-México; 2007.

### **PÁGINAS WEB**

1. <http://personales.able.es>
2. <http://es.scribd.com>
3. <http://fisicaexpdemostrativos.uniandes.edu.co>
4. <http://almadeherrero.blogspot.com>